

Физико-механические характеристики композитных материалов на основе полимеров по экспериментальным данным

Александр Алексеевич Пискунов¹ , Сергей Анатольевич Луканкин¹ ,
Ольга Константиновна Петропавловских² , Артур Маратович Шарипов¹ ,
Ания Айратовна Ибрагимова^{1*} 

¹ Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация

² Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: anya13@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Использование полимерных композитов в качестве конструкционного материала для пролетных строений мостов представляет собой перспективное направление для научных исследований и опытно-конструкторских работ, особенно в сложных климатических и инженерно-геологических условиях. В настоящее время ведется экспериментальная работа по исследованию применения полимерных композитных материалов в пролетных строениях мостовых сооружений, что требует проведения испытаний опытных образцов, направленных на подбор оптимального сочетания материалов и определение технологии производства работ. Целью работы является выявление методов для повышения эффективности использования полимерных композитных материалов в конструкциях пролетных строений мостов на основе изучения их физико-механических характеристик в рамках экспериментальных исследований. **Методы и материалы.** Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки конструктивно-подобной модели пролетного строения моста из полимерных композитных материалов, отвечающей современным требованиям к устойчивости и безопасности, что способствует развитию инфраструктуры в труднодоступных северных регионах. Разнообразие волокон, матричных материалов и схем армирования, применяемых при создании конструкций из ПКМ, дает возможность регулировать такие характеристики, как прочность, жесткость, температурный режим эксплуатации, а также другие физико-механические свойства материалов.

Результаты и обсуждение. В ходе исследования выполнен краткий обзор компонентов, входящих в состав полимерных композитных материалов, разработана программа испытаний, согласно которой изготовлена и испытана партия плоских образцов из материалов отечественного производства. Подбор состава, корректировка соотношений компонентов и совершенствование макроструктуры композита позволяет добиваться оптимальных эксплуатационных характеристик в зависимости от предъявляемых требований. **Заключение.** Проведены испытания плоских образцов композитных материалов на основе полимеров, направленных на определение значений их физико-механических, прочностных и деформационных характеристик. Полученные результаты испытаний ПКМ сопоставимы с показателями традиционных конструкционных материалов. Обоснована целесообразность применения стеклопластика в высоконагруженных элементах конструкций, что демонстрирует потенциал для разработки проекта пролетного строения моста из ПКМ. Обозначены перспективы дальнейших исследований, основанных на расчетно-экспериментальном анализе узловых соединений элементов из ПКМ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полимерный композитный материал, статические испытания, наполнитель, армирующее волокно, матрица, связующее, мост, мостовое сооружение, пролетное строение

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование проведено в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в форме субсидии на выполнение крупного научного проекта по приоритетному направлению научно-технологического развития, соглашение № 075–15–2024–559 от 25.04.2024 года.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Пискунов А.А., Луканкин С.А., Петропавловских О.К., Шарипов А.М., Ибрагимова А.А. Физико-механические характеристики композитных материалов на основе полимеров по экспериментальным данным. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(1):54–67. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-54-67>. – EDN: TPGTYO.

Stress-strain properties of polymer-based composite materials according to experimental evidence

Alexander A. Piskunov¹ , Sergei A. Lukankin¹ , Olga K. Petropavlovskikh² , Artur M. Sharipov¹ ,
Aniia A. Ibragimova^{1*} 

¹ Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

² Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: anyia13@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The use of polymer composites as structural materials for bridge superstructures represents a promising area for scientific research and development, particularly in challenging climatic and geological engineering conditions. The use of polymer composites as structural materials for bridge superstructures represents a promising area for scientific research and development, particularly in challenging climatic and geological engineering conditions. The aim of the work is to identify methods for increasing the efficiency of using polymer composite materials in bridge span structures based on the study of their physico-mechanical characteristics as part of experimental studies. **Methods and materials.** The relevance of this research stems from the need to develop a structurally similar model of a bridge superstructure made of polymer composite materials that meets modern stability and safety requirements, thereby facilitating infrastructure development in remote northern regions. The variety of fibers, matrix materials and reinforcement schemes used in the creation of polymer composite structures makes it possible to control characteristics such as strength, rigidity, operating temperature and other physical and mechanical properties of materials. **Results and Discussion.** The study included a brief overview of the components of polymer composite materials and the development of a testing program, which led to the production and testing of a batch of flat samples using domestically produced materials. Selecting the composition, adjusting the component ratios and improving the composite's macrostructure allows for optimal performance characteristics depending on the requirements. **Conclusion.** Tests of flat FRP samples aimed at determining the values of their physico-mechanical, strength and deformation characteristics have been carried out. The test results obtained for FRP are comparable to those of traditional structural materials. The expediency of using fiberglass in highly loaded structural elements is substantiated, which demonstrates the potential for developing a bridge superstructure design from FRP. The prospects for further research based on computational and experimental analysis of nodal connections of elements from FRP are outlined.

KEYWORDS: polymer composite material, static testing, filler, reinforcing fiber, matrix, binder, bridge, bridge structure, superstructure

ACKNOWLEDGEMENTS: The study was conducted as part of a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the form of a subsidy for the implementation of a major scientific project in the priority area of scientific and technological development, agreement №075-15-2024-559 dated 04/25/2024.

FOR CITATION:

Piskunov A.A., Lukankin S.A., Petropavlovskikh O.K., Sharipov A.M., Ibragimova A.A. Stress-strain properties of polymer-based composite materials according to experimental evidence. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(1):54–67. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-54-67>. – EDN: TPGTYO.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно Транспортной стратегии РФ [1], развитие железных и автомобильных дорог, а также транспортной инфраструктуры необходимо для повышения доступности регионов, в особенности удаленных и арктических территорий [2, 3, 4, 5]. Внедрение композитных материалов на основе полимеров в различных отраслях народного хозяйства определяется Национальным проектом [6], целью которого является развитие производства и применения полимерных композитных материалов (далее – ПКМ) и изделий из них.

Пролетные строения мостов из ПКМ являются актуальным инженерным решением, разработка которых требует проведения научных исследований, с целью анализа технических, технологических, эксплуатационных вопросов, влияющих на безопасность и эксплуатационную надежность мостовых сооружений [7, 8, 9].

В условиях Крайнего Севера мостовые конструкции подвергаются влиянию низких температур [10]. По сравнению с традиционными конструкционными материалами, применение в строительстве мостов из ПКМ в экстремальных условиях имеет ряд преимуществ. Подобные конструкции обеспечивают

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

высокую прочность, обладают антикоррозионной стойкостью, диэлектрическими свойствами и способностью работать в сложных климатических условиях [11, 12, 13]. Пролетные строения из ПКМ имеют меньший вес, по сравнению с конструкциями из традиционных материалов, что снижает нагрузки на фундаменты [14].

Проведены испытания для определения упругих и прочностных физико-механических характеристик ПКМ. Для каждого вида испытаний изготовлены образцы из отечественных компонентов, в которых наполнитель выполнен из разных типов стеклоткани, а в качестве связующих материалов применялись полиуретановые, эпоксидные и пленочные матрицы. Количество слоев и угол укладки армирующих волокон в образцах переменный, что позволяет оптимизировать физико-механические характеристики материалов.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Основной характеристикой волокнистых композитных материалов является управляемая анизотропия механических свойств вдоль и поперек волокон, что достигается путем изменения углов укладки армирующих волокон [15]. В качестве примера в таблице 1 представлена анизотропия ПКМ КМУ-3, в состав которого входят углеродное волокно и связующее на основе эпоксидной смолы (табл. 1).

Перекрестная укладка монослоев способствует снижению анизотропии материала, уменьшая чувствительность к концентрациям напряжений в плоскости укладки слоев.

На рисунке 1 представлен график, иллюстрирующий изменения модуля упругости при растяжении E и модуля сдвига G в зависимости от угла армирования для однонаправленного стеклопластика СК-5-211, который состоит из стеклоткани Т-25 и эпоксидного связующего 5-211Б.

ПКМ состоит из наполнителя и матрицы: наполнитель является армирующим элементом композита, обеспечивающим необходимые физико-механические характеристики материала, а матрица выступает

в роли связующего, регулирующего совместную работу армирующих элементов.

Матричные материалы воспринимают напряжение, возникающее в композиции под воздействием внешних нагрузок [16, 17]. Волокна обеспечивают жесткость и прочность материала в направлении их ориентации [18, 19]. Взаимодействие матрицы и волокна в волокнистых ПКМ происходит на нескольких уровнях. На молекулярном уровне происходят адгезионные взаимодействия [20]. На микроскопическом уровне происходит взаимодействие между матрицей и волокном, а на макроскопическом уровне взаимодействие выражается в распределении нагрузок [21].

Наполнитель оказывает влияние на формирование основных характеристик ПКМ, особенно прочностных свойств. Теоретическая прочность материалов σ_m увеличивается с ростом модуля упругости E и поверхностной энергии γ вещества и снижается с увеличением расстояния между соседними атомными плоскостями α_0 [22]:

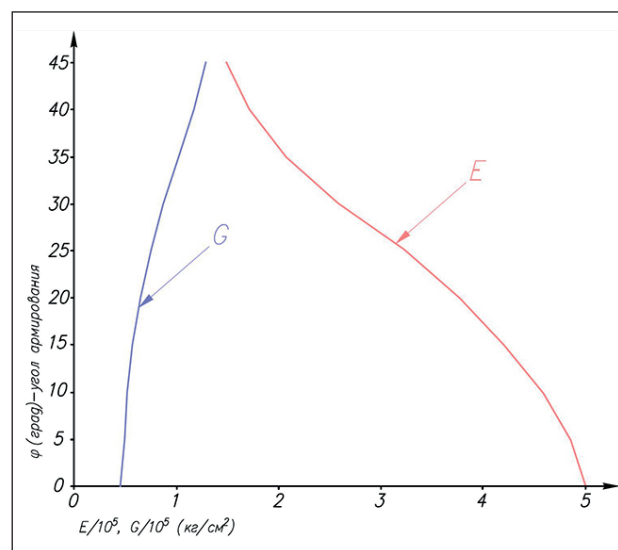


Рис. 1. Изменение модулей упругости E и модуля сдвига G в зависимости от угла армирования для стеклопластика СК-5-211

Таблица 1. Анизотропия свойств полимерного композитного материала КМУ-3

Свойства углепластиков, кгс/мм 2	Угол армирования		
	[0]	[0, 90, ± 45]	[0, 90]
σ_x^+	80	30	50
σ_x^-	75	50	42
τ_{xy}	7	12	8
E_x	14 000	5400	7000
G_{xy}	600	1750	700–800

$$\sigma_m = (\gamma E / \alpha_0)^{1/2}. \quad (1)$$

Таким образом, высокопрочные твердые тела должны обладать высокими модулями упругости, значительной поверхностной энергией и как можно более высоким количеством атомов в единице объема. Этим критериям удовлетворяют бериллий, бор, углерод, азот, кислород, алюминий и кремний. При создании высокомодульных волокнистых ПКМ используются стеклянные, углеродные, борные и органические волокна, а также волокна и нитевидные кристаллы ряда карбидов, оксидов, нитридов и других соединений. Наиболее часто используемые композитные материалы в мостостроении — это углепластик и стеклопластик [23].

Основным видом неорганических армирующих волокон являются стекловолокна и стеклонити. Применение неорганических волокон для производства ПКМ обусловлено их огнестойкостью и устойчивостью к агрессивным средам [24].

Углеродные волокна относятся к хрупким материалам, поэтому необходимые для армирования текстильные структуры изготавливаются на основе трех типов волокон-прекурсоров: полиакрилонитрильных, вискозных и пековых (получаемых из нефтяных и каменноугольных пеков) [25, 26]. Углеродные волокна характеризуются высокой термостойкостью, трудногорючестью и устойчивостью к химическим воздействиям [27, 28].

Армирующие компоненты в композитных материалах могут быть представлены в различных формах, таких как моноволокна, крученые нити, жгуты, сетки, ткани, ленты, холсты и др. Одними из самых распространенных армирующих компонентов для ПКМ являются ткани. Они могут различаться по типу волокон, методу плетения и назначению. В одной ткани могут быть использованы различные комбинации типов, материалов волокон и способов плетения. К нетканым волокнистым наполнителям относятся различные виды переплетенных, спутанных, рассеченных и неориентированных волокон, которые могут быть представлены в виде отдельных пряжей, полотен, матов, нетканых сеток, вуалей, бумаги, картона и др.

Подбор матрицы и анализ ее применимости в конструкциях проводятся индивидуально с учетом реологических свойств материала, а также свойств, связанных с особенностями процессов структурообразования: стеклования, кристаллизации и отверждения.

В качестве связующего материала применяются два основных класса связующих: термопластичные (отверждаются при охлаждении) и термореактивные (отверждаются в результате химической реакции) [29].

К числу наиболее распространенных термопластов на основе карбоцепных полимеров относят полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид, полистирол и полиакрилаты [30].

Реактопласты делятся на категории в зависимости от применяемой основы: фенопласты (на основе фенолоформальдегидных смол); аминопласты (на основе меламино- и мочевиноформальдегидных смол); эфиропласты (на основе полиэфирных смол); эпоксипласты (на основе эпоксидных смол).

Для конструкций из ПКМ в качестве связующего используются полиэфирные и эпоксидные смолы. Эпоксидные смолы, по сравнению с полиэфирными, прочнее, они более жесткие и хрупкие. Эпоксидные смолы отличаются прочностью, термостойкостью и хорошей адгезией к армирующим волокнам среди всех реактопластов, что делает их предпочтительными для изготовления изделий, подверженных высоким нагрузкам [30].

Для проведения испытаний изготовлены серии образцов из материалов отечественного производства на основе стеклотканей Т10 и Т25. В качестве матричных материалов использованы: пленочный клей ВК-51, эпоксидные смолы L285 и ЭД20, полиуретановое связующее Huntsman, эпоксидная композиция ХТ118.

В ходе исследования проведены статические испытания образцов из ПКМ на растяжение, сжатие, сдвиг в плоскости листа и межслойный сдвиг с целью подбора оптимального сочетания конструкционных материалов, согласно действующим требованиям ГОСТ.

Объектом исследования являются образцы для каждой комбинации «наполнитель-матрица», полученные путем вырезания из плоских монолитных панелей, изготовленных методом вакуумного формования (холодная выкладка). Всего испытано более 400 шт. сухих образцов (RTD) при нормальных климатических условиях $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ согласно ГОСТ 12423-2013.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Испытания на растяжение

Испытания проводились в условиях нормальной температуры в помещении на испытательной машине, обеспечивающей растяжение образца с заданной постоянной скоростью перемещения активного захвата (рис. 2). На рисунке 3 представлена фотоиллюстрация образцов из ПКМ до и после испытаний на растяжение.

Из графика (рис. 4) следует, что на начальном этапе наблюдается линейная зависимость между нагрузкой и деформацией, материал выдерживает нагрузки. С увеличением нагрузки кривая начинает



Рис. 2. Внешний вид захватов для испытаний на растяжение

изгибаться, что указывает на начало пластической деформации. Далее кривые имеют схожие очертания, до достижения предела прочности, что указывает на однородность свойств образцов при выполнении испытаний. После достижения максимальной нагрузки наблюдается ее спад, что указывает на начало разрушения образца через смещение волокон или повреждения матрицы.

На графике (рис. 5) показана зависимость между напряжением и деформацией. При низких значениях деформации наблюдается линейный участок, где материал ведет себя упруго. Это указывает на то, что напряжение пропорционально деформации и соответствует закону Гука. Значительное увеличение напряжения свидетельствует о начале пластической деформации. При напряжениях от 400 до 550 МПа происходят изменения, связанные с достижением предельного состояния и деструкцией материала.

Результаты испытаний на растяжение образцов из ПКМ представлены в таблице 2. ПКМ на основе стеклоткани продемонстрировали разнообразие в значении воспринимаемой максимальной нагрузки при испытаниях на растяжение. Согласно результатам испытаний, предел прочности образцов из ПКМ может достигать 621,9 МПа, что сравни-

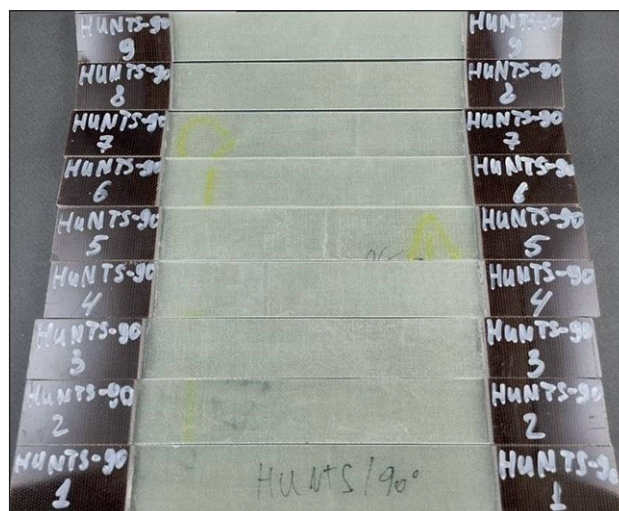


Рис. 3. Фотоиллюстрация образцов из ПКМ на основе стеклоткани Т-10 и связующего Huntsman, направление армирования 90° до и после испытаний на растяжение

мо с характеристиками традиционных материалов. Образцы с наполнителем Т10, армированные под углом 0°, демонстрируют наиболее высокие значения предела прочности на основе пленочного клея ВК-51 и эпоксидных смол ХТ118 и ЭД20. Однако для образцов с наполнителем Т25 и аналогичной матрицей ВК-51 обеспечивается меньший предел прочности. Наилучшими результатами из полученных отмечены сочетания, имеющие угол армирования 0°, обратный эффект имеют результаты испытаний образцов на растяжения у сочетаний с направлением армирования 45°.

Испытания на сжатие

Сущность метода заключается в испытании образцов из ПКМ на сжатие с постоянной скоростью

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

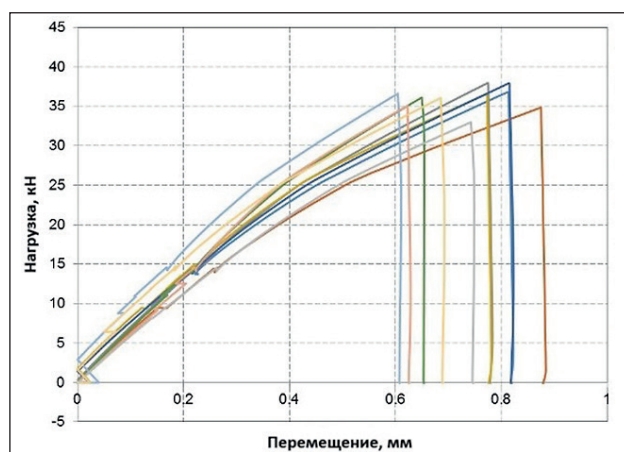


Рис. 4. График зависимости перемещений от нагрузки при испытании на растяжение образцов из ПКМ на основе стеклоткани Т-25 и связующего ВК-51, направление армирования 0°

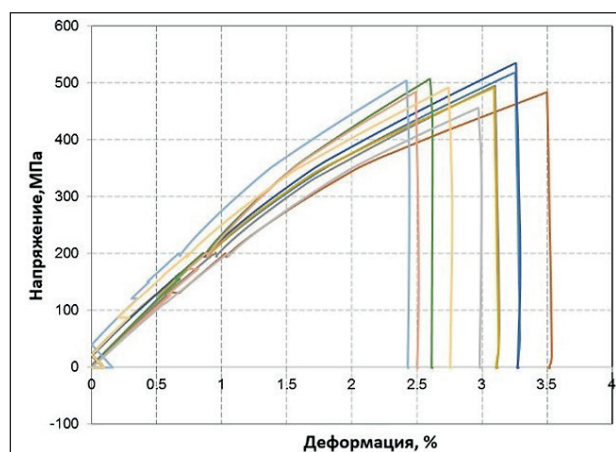


Рис. 5. График напряженно-деформированного состояния при испытании на растяжение образцов из ПКМ на основе стеклоткани Т-25 и связующего ВК-51, направление армирования 0°

Таблица 2. Результаты испытаний образцов на растяжение

№	Наполнитель, направление армирования	Связующее	Ширина, мм	Толщина, мм	Макс. нагрузка, кН	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, ГПа	Кэф. Пуассона
1	T10, 0°	ВК-51	24,61	1,98	28,575	585,370	25,191	0,187
2	T25, 0°	ВК-51	25,147	2,889	36,086	496,905	21,023	0,143
3	T10, 0°	L285	25,24	2,47	20,72	332,05	11,74	–
4	T10, 90°	L285	25,15	2,50	33,49	531,46	20,52	–
5	T10, 45°	L285	25,05	2,45	8,72	140,57	8,23	–
6	T10, 0°	Huntsman	25,11	2,48	38,67	621,89	19,02	–
7	T10, 90°	Huntsman	24,86	2,50	21,05	338,83	11,33	–
8	T10, 45°	Huntsman	24,97	2,44	9,21	151,93	8,48	–
9	T10, 0°	ХТ118	25,40	2,36	33,76	562,89	20,89	–
10	T10, 90°	ХТ118	25,39	2,41	19,98	326,51	11,68	–
11	T10, 45°	ХТ118	25,32	2,41	6,51	106,68	9,40	–
12	T10, 0°	ЭД20	24,71	2,59	76,13	532,3	21,28	–
13	T10, 90°	ЭД20	25,01	2,69	23,53	353,78	12,33	–
14	T10, 45°	ЭД20	25,45	2,67	8,35	123,40	8,16	–

деформирования, при этом образец устанавливается в оснастку испытательной машины таким образом, чтобы продольные оси захватов и образца совпали с прямой, соединяющей точки крепления захватов.

Фотоиллюстрация образцов из полимерного композитного материала до и после испытаний на сжатие представлена на рисунке 6.

В таблице 3 представлены результаты испытаний образцов из ПКМ на сжатие. Показатели предела прочности при сжатии состоят в диапазоне от 146,7 МПа до 341,6 МПа. Аналогично результатам испытаний на растяжение, образцы с углом армиро-

вания 0° имеют наиболее высокие показатели, что может свидетельствовать об оптимальном армировании материала в этом направлении. Сочетания с углами армирования 90° и 45° показывают снижение прочности.

Испытания на сдвиг в плоскости листа

Метод испытаний заключается в растяжении образца с V-образными надрезами, закрепленного в двух захватах таким образом, что рабочая зона образца между вершинами надрезов располагается

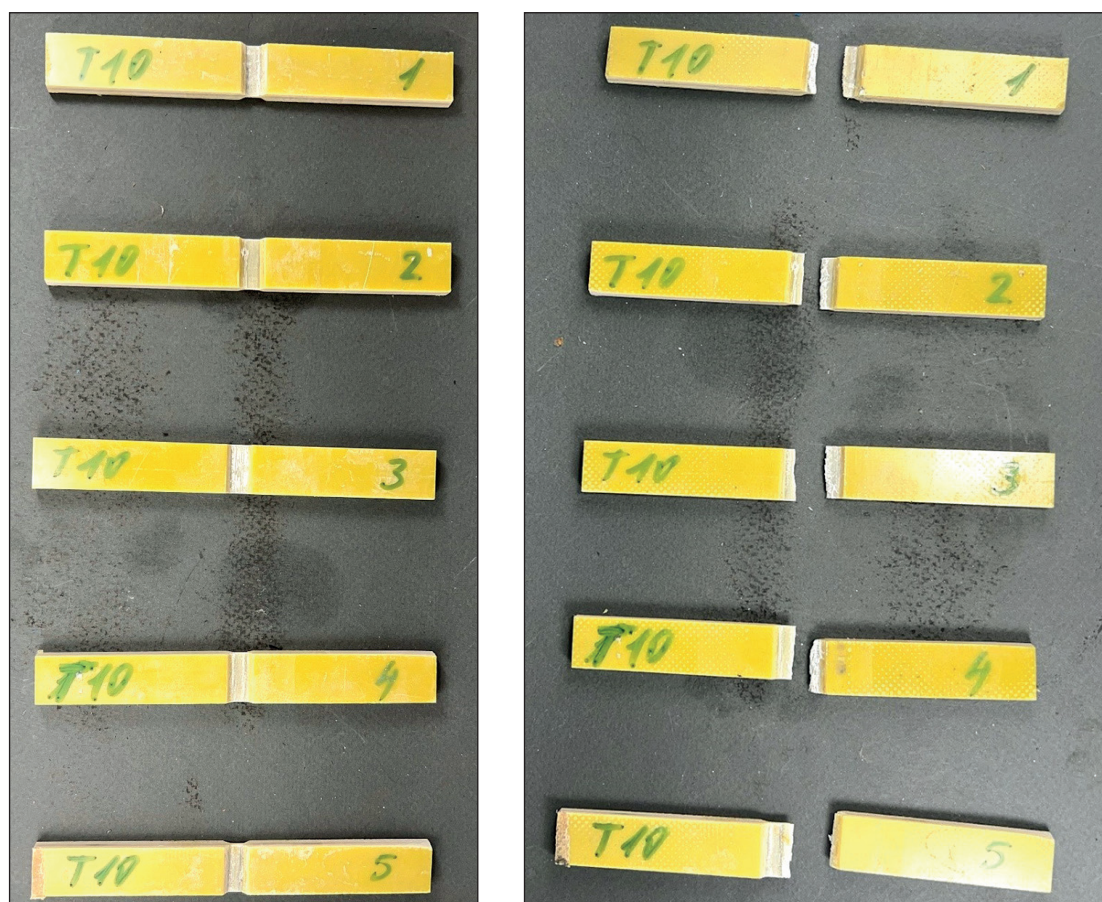


Рис. 6. Фотоиллюстрация образцов из ПКМ на основе стеклоткани T-10 и связующего ВК-51, направление армирования квазиизотропное до и после испытаний на сжатие

Таблица 3. Результаты испытаний образцов на сжатие

№	Наполнитель, направление армирования	Связующее	Ширина, мм	Толщина, мм	Максимальная нагрузка, кН	Предел прочности при сжатии, МПа
1	T10, 0°	ВК-51	14,870	1,417	7,101	341,596
2	T10, 90°	ВК-51	14,980	1,403	4,681	223,384
3	T10, 45°	ВК-51	15,051	1,375	3,021	146,723
4	T10, квазиизотропное	ВК-51	14,987	1,194	4,654	260,099
5	T25, 0°	ВК-51	15,560	1,615	9,119	362,737

параллельно оси нагружения, что обеспечивает создание в образце деформаций сдвига. Каждая половина приспособления состоит из захвата и двух губок с газотермическим покрытием. Три болта создают прижимное усилие на каждой губке для фиксации образца под нагрузкой (рис. 7).

Фотографии образцов, испытанных на сдвиг в плоскости листа представлены на рисунке 8.

Из графика (рис. 9) следует, что на первых этапах испытаний все образцы показывают линейное увеличение нагрузки с увеличением перемещения.

При переходе графика в пластическую область каждый образец достигает своего максимального значения нагрузки. Затем наблюдается плато – образцы выдерживают заданную нагрузку, но проявляют различия в прочности и устойчивости к постоянному сдвигу. Впоследствии линии графика резко стремятся вниз, указывая на предельное состояние материала.

В начале испытаний при небольших нагрузках образцы демонстрируют линейную упругую деформацию. Затем большинство образцов достигает мак-

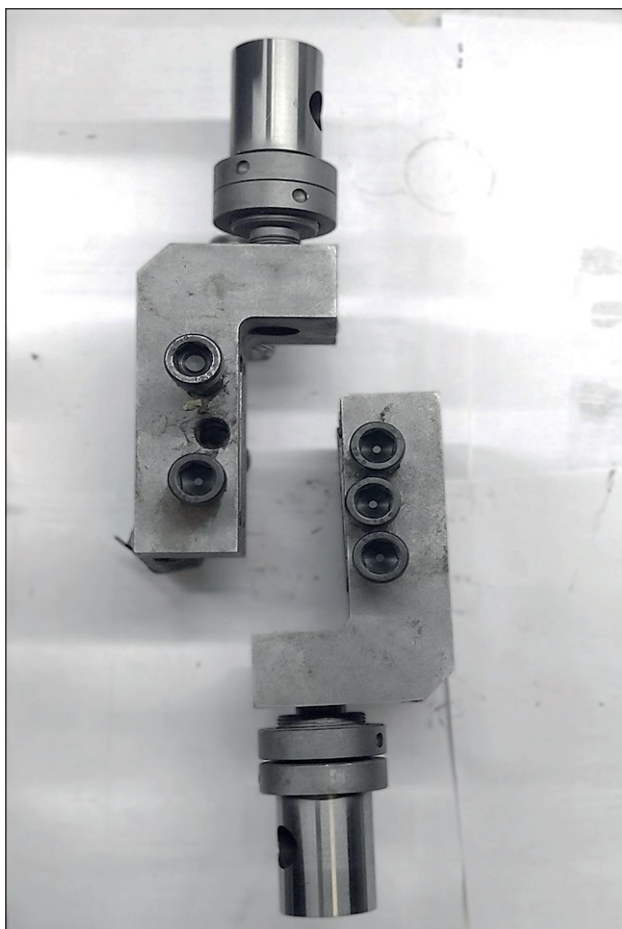


Рис. 7. Внешний вид оснастки для испытаний на сдвиг в плоскости листа

симальной нагрузки, после чего начинается резкое снижение, указывающее на разрушение (рис. 10).

На графике (рис. 11) показаны упругие деформации на начальной стадии испытания, после чего происходит переход к пластической деформации. Различия в максимальных значениях нагрузки и пе-

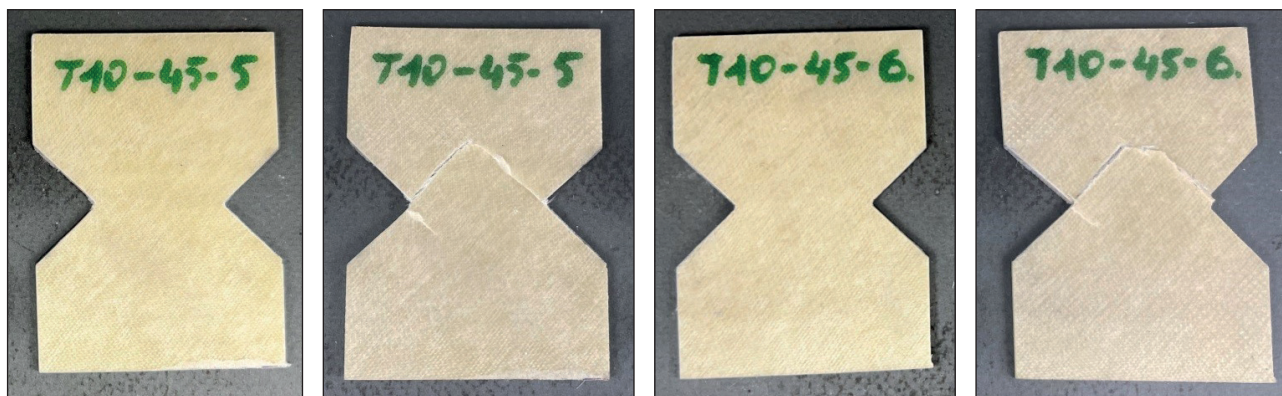


Рис. 8. Фотография образцов из ПКМ на основе стеклоткани Т-10 и связующего ВК-51, направление армирования 45° до и после испытаний на сдвиг в плоскости листа

ремещении между образцами подчеркивают вариации в прочностных характеристиках, где в некоторых образцах наступает хрупкое разрушение, а другие при тех же нагрузках, находятся в зоне пластических деформаций.

График (рис. 12) показывает, что образцы имеют различные характеристики по прочности и жесткости. Направление армирования, заявленное как квазиизотропное, может объяснять некоторые особенности поведения образцов: в таких случаях свойства материалов могут варьироваться в зависимости от угла приложения нагрузки. Образцы продемонстрировали неоднородную реакцию на сдвиговые нагрузки, что подчеркивает важность выбора оптимальных углов армирования для достижения требуемых физико-механических характеристик материалов.

На начальном участке графика (рис. 13) отмечается линейная зависимость, указывающая на способность материала выдерживать нагрузки без значительных деформаций. Образцы достигают пиковых значений нагрузки, после чего рост нагрузки замедляется при увеличении перемещения, начинается процесс неупругих деформаций. Впоследствии происходит резкое падение нагрузки при увеличении перемещения, что указывает на потерю прочности.

Результаты испытаний образцов из ПКМ на сдвиг в плоскости листа представлены в таблице 4. Предел прочности при сдвиге в плоскости листа образцов из ПКМ достигает 91,9 МПа. Положительные результаты показали образцы ПКМ, с наполнителем, уложенным под 45° и квазиизотропно армированным, однако эти же образцы в испытаниях на растяжение и сжатие показали обратный результат.

Испытания на межслойный сдвиг

Эффективность взаимодействия матрицы и связующего в конкретном образце оценивается по способности материала сопротивляться разрывным

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

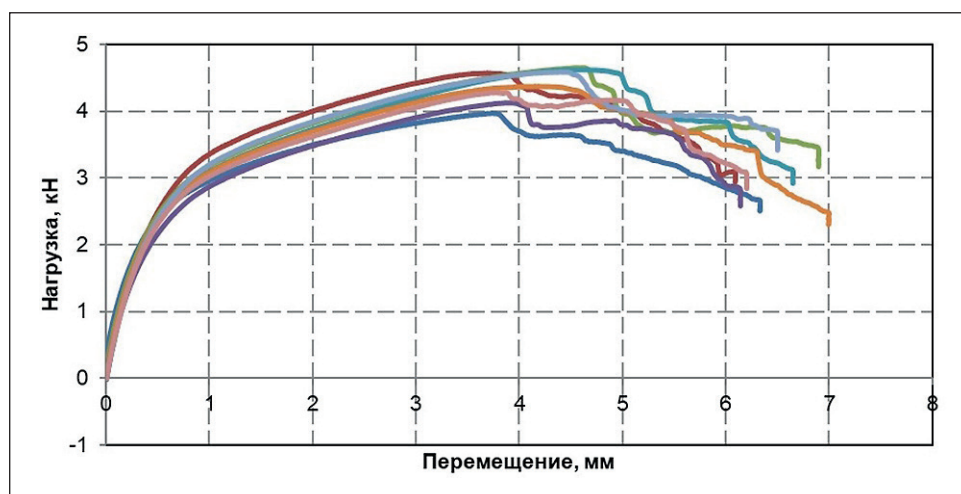


Рис. 9. График зависимости перемещений от нагрузки при испытании на сдвиг в плоскости листа образцов из ПКМ на основе стеклоткани Т-10 и связующего ВК-51, направление армирования 0°

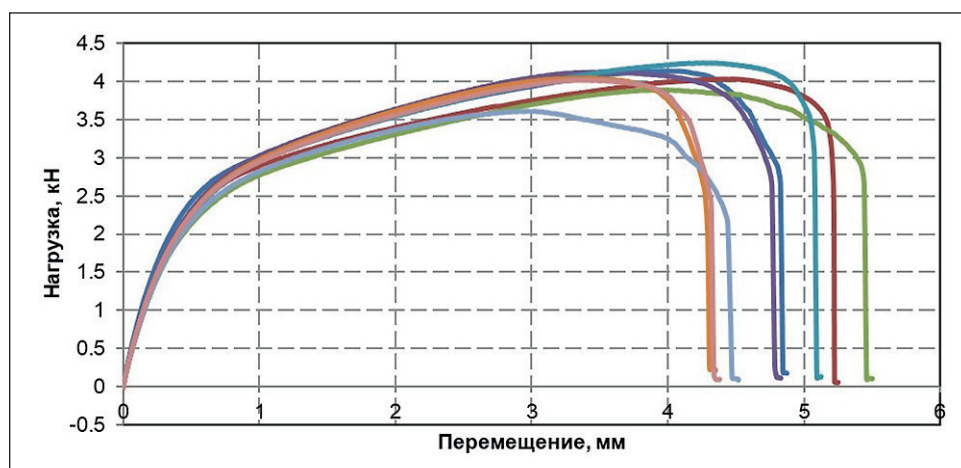


Рис. 10. График зависимости перемещений от нагрузки при испытании на сдвиг в плоскости листа образцов из ПКМ на основе стеклоткани Т-10 и связующего ВК-51, направление армирования 90°

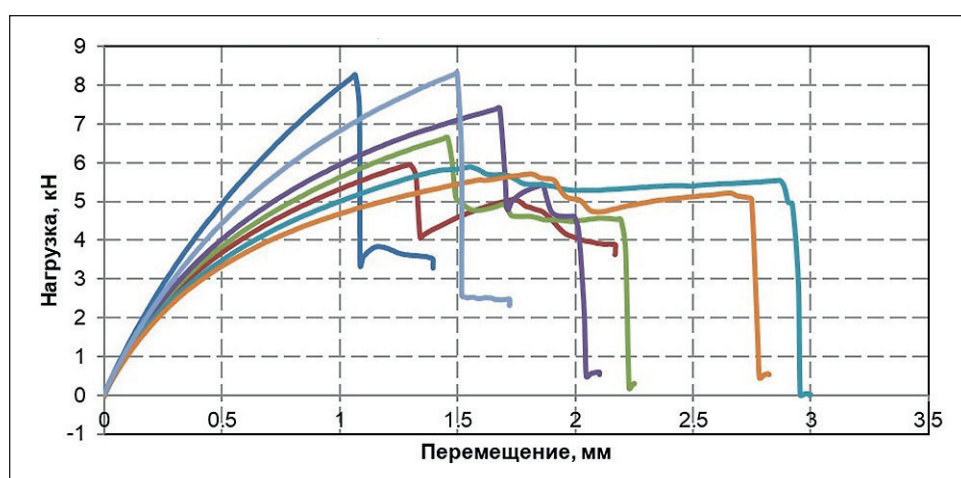


Рис. 11. График зависимости перемещений от нагрузки при испытании на сдвиг в плоскости листа образцов из ПКМ на основе стеклоткани Т-10 и связующего ВК-51, направление армирования 45°

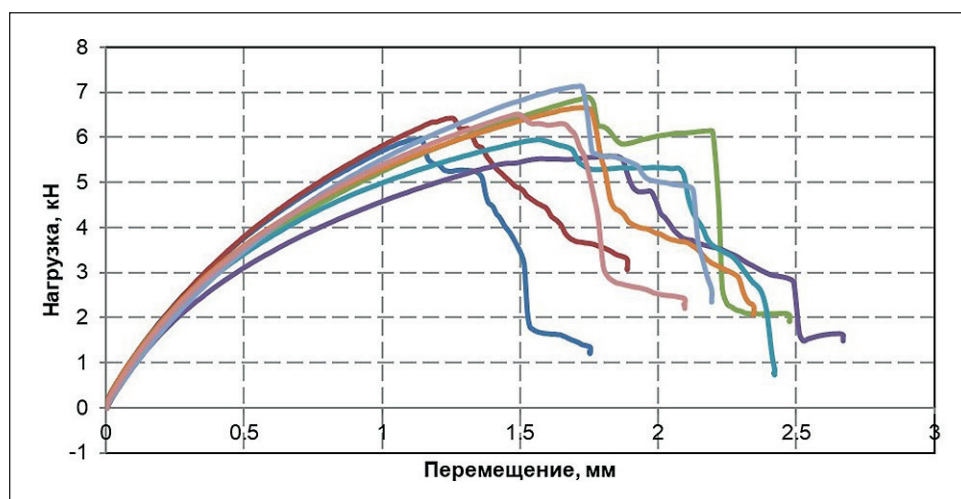


Рис. 12. График зависимости перемещений от нагрузки при испытании на сдвиг в плоскости листа образцов из ПКМ на основе стеклоткани Т-10 и связующего ВК-51, направление армирования квазиизотропное

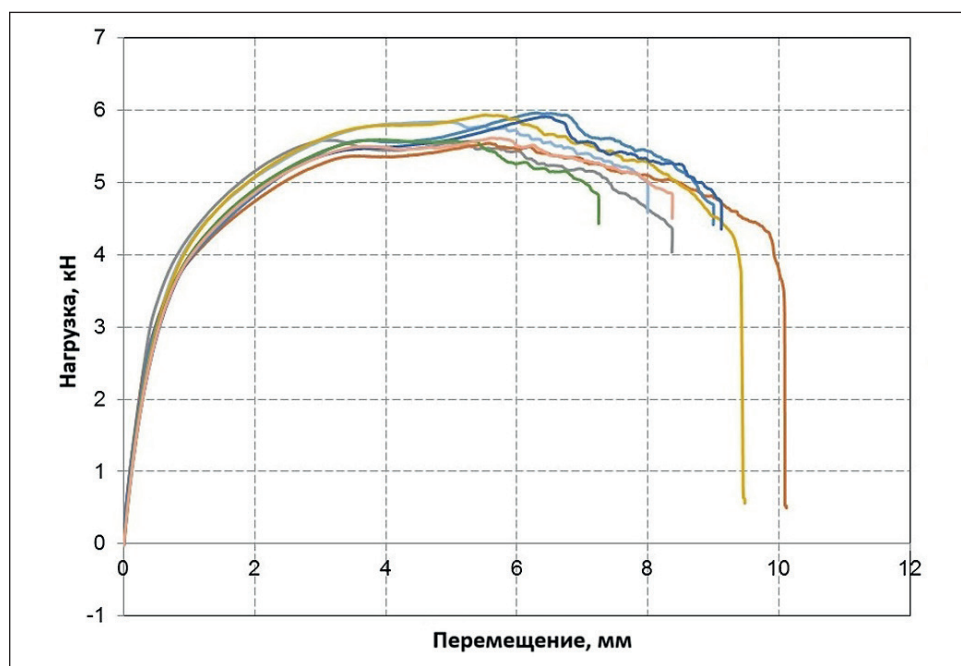


Рис. 13. График зависимости перемещений от нагрузки при испытании на сдвиг в плоскости листа образцов из ПКМ на основе стеклоткани Т-25 и связующего ВК-51, направление армирования 0°

Таблица 4. Результаты испытаний образцов на сдвиг в плоскости листа

№	Наполнитель, направление армирования	Связующее	Толщина, мм	Высота, мм	Макс. нагрузка, кН	Предел прочности, МПа	Модуль сдвига, ГПа
1	T10, 0°	ВК-51	1,624	29,504	4,398	91,858	3,000
2	T10, 90°	ВК-51	1,574	29,765	4,016	85,752	3,227
3	T10, 45°	ВК-51	1,560	29,759	6,888	148,499	8,581
4	T10, квазиизотропное	ВК-51	1,553	30,003	6,387	137,165	6,440
5	T25, 0°	ВК-51	2,008	30,123	5,747	95,050	3,022

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

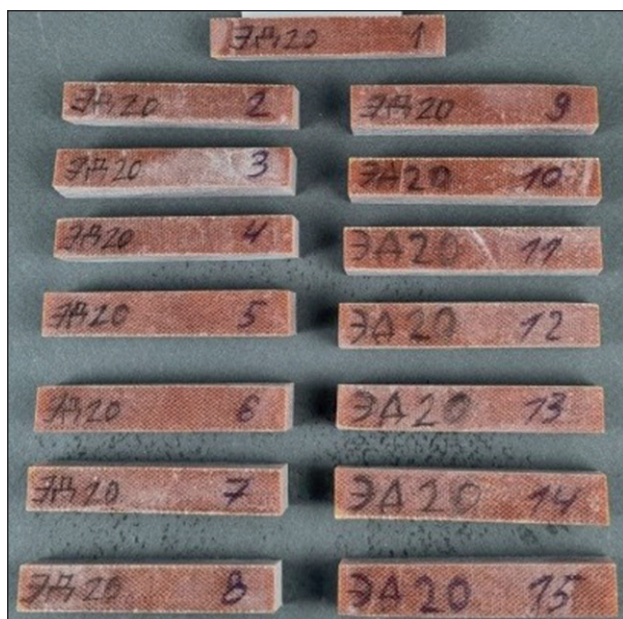


Рис. 14. Фотография образцов из ПКМ на основе стеклоткани Т-10 и связующего ЭД20, направление армирования 0° до и после испытаний на межслойный сдвиг

нагрузкам, возникающим между слоями композитной структуры. Испытания методом короткой балки проводились на испытательной машине, обеспечивающей нагружение образцов с заданной постоянной скоростью перемещения активного захвата и измерение нагрузки. Фотоиллюстрация образцов до и после испытания на межслойный сдвиг приведена на рисунке 14.

В таблице 5 представлены результаты испытаний образцов из ПКМ на межслоевой сдвиг. Предел прочности при межслойном сдвиге при сочетаниях с различными типами связующих находится в диапазоне от 23,5 МПа до 28,2 МПа. Образцы на основе полиуретанового связующего Huntsman и эпоксидной смолы L285 показали менее удовлетворительные результаты по сравнению с другими образцами, что

может указывать на недостаточную эффективность этих матриц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

1. В соответствии с программой исследований проведены испытания партии образцов из ПКМ на растяжение, сжатие, сдвиг в плоскости листа и межслоевой сдвиг. При изготовлении образцов использованы сочетания различных типов связующих и наполнителей с переменным углом армирования. По результатам испытаний получены значе-

Таблица 5. Результаты испытаний образцов на межслойный сдвиг

№	Наполнитель, направление армирования	Связующее	Ширина, мм	Толщина, мм	Макс. нагрузка, кН	Предел прочности при сдвиге, МПа
1	Т10, 0°	Huntsman	10,025	7,406	2,249	23,528
2	Т10, 0°	L285	10,383	7,386	2,560	25,034
3	Т10, 0°	ХТ118	10,141	9,395	3,141	24,852
4	Т10, 0°	ЭД20	10,141	9,395	3,587	28,235

ния физико-механических характеристик образцов из ПКМ.

2. Результаты испытаний образцов ПКМ на основе стеклоткани Т10 И Т25 сравнимы с характеристиками материалов, таких как сталь, алюминий, древесина. ПКМ обладают более высоким соотношением прочности к плотности (удельной прочности) по сравнению с большинством традиционных конструкционных материалов. Использование стеклот-

каней в качестве заполнителя ПКМ в высоконагруженных конструкциях обусловлено ее сравнительно высокой прочностью на растяжение. Полученные результаты позволяют эффективно и функционально применить ПКМ в создании концептуального решения пролетного строения мостового сооружения.

3. Для дальнейшей работы необходимо провести расчеты и экспериментальные исследования соединений конструктивных элементов и узлов из ПКМ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 № 3363-р: *официальный интернет-портал правовой информации*. URL: <http://www.pravo.gov.ru> (дата обращения: 13.05.25)
2. Минаева Т.С., Гуляев С.С. Строительство мостов как проблема развития городской инфраструктуры Европейского Севера России в начале XX в. *Экономическая история*. 2019;15(2):125–135. <https://doi.org/10.15507/2409-630X.045.015.201902.125-135> EDN: **WOXRGM**
3. Федорова Н.В., Исмагилов М.И. Проблема строительства и эксплуатации сооружений в условиях Крайнего Севера. *Наука, образование и культура*. 2025;1(71):8-10. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_80285895_34473092.pdf EDN: **WTQOHQ**
4. Линейцев А.А. Проблемы строительства сооружений в Арктике. *Молодой ученый*. 2021;5(347):74-78. <https://moluch.ru/archive/347/77997> EDN: **GBZHDC**
5. Серова Н.А., Серова В.А. Транспортная инфраструктура российской Арктики: специфика функционирования и перспективы развития. *Проблемы прогнозирования*. 2021;2(185):142-151. <https://doi.org/10.47711/0868-6351-185-142-151> EDN: **JGZPVW**
6. Новые материалы и химия: *официальный интернет-портал*. URL: <https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--plai/new-projects/novye-materialy-i-khimiya/> (дата обращения: 27.06.25)
7. Ali H.T., Akrami R., Fotouhi S., Bodaghi M., Saeedifar M., Yusuf M., Fotouhi M. Fiber reinforced polymer composites in bridge industry. *Structures*. 2021;30:774-785. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.092> EDN: **LSYYQJ**
8. Qureshi J. A Review of Fibre Reinforced Polymer Bridges. *Fibers*. 2023;11(5):40. <https://doi.org/10.3390/fib11050040> EDN: **ANGXTR**
9. Иванов А.Н. Проблемы применения полимерных композиционных материалов в несущих конструкциях железнодорожных мостов. *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. 2020;3(54):29-37. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44109353_39020059.pdf EDN: **NMZLHC**
10. Кондратов Н. А. Особенности развития транспортной инфраструктуры в Арктической зоне России. *Географический вестник*. 2017; 4(43):68-80. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2017-4-68-80> EDN: **YLJJBQ**
11. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы. *Томск: Изд-во Томского политехнического университета*. 2013;111
12. Ушаков А.Е., Кленин Ю.Г., Сорина Т.Г., Хайретдинов А.Х., Сафонов А.А. Мостовые конструкции из композитов. *Композиты и наноструктуры*. 2009;3(3):25-37. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15171215> EDN: **MTZUGR**
13. Zinnurov T.A., Piskunov A.A., Safiyulina L.G., Petropavlovskih O.K., Yakovlev D.G., Bereznoi D.V., Balafendieva I.S. Numerical modeling of composite reinforcement with concrete. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1158.4:042046. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1158/4/042046> EDN: **HPUQJK**
14. Власенко Ф.С., Раскутин А.Е. Применение полимерных композиционных материалов в строительных конструкциях. *Труды ВИАМ*. 2013;8:3. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_20205739_90754678.pdf EDN: **RAEFMB**
15. Gonabadi H., Oila A., Yadav A., Bull S. Investigation of anisotropy effects in glass fibre reinforced polymer composites on tensile and shear properties using full field strain measurement and finite element multi-scale techniques. *Journal of Composite Materials*. 2021. <https://doi.org/10.1177/00219983211054232> EDN: **MFGBMO**
16. Mukherjee G.S., Jain A., Banerjee M. Engineering Matrix Materials for Composites: Their Variety, Scope and Application. *Fine Chemical Engineering*. 2023;13-45. <https://doi.org/10.37256/fce.4120232128> EDN: **MGWYIP**

17. Сокольская М.К., Колосова А.С., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. Связующие для получения современных полимерных композиционных материалов. *Фундаментальные исследования*. 2017;10-2:290-295. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_30459320_46457803.pdf EDN: ZQOBRB
18. Jimit R., Kamarul A.Z., Vapokutty O. Influence of fiber orientation on mechanical properties of fiberglass reinforced composite. *Proceeding of Mechanical Engineering Research Day*. 2017; 318-319. https://www.researchgate.net/publication/317713253_Influence_of_fiber_orientation_on_mechanical_properties_of_fiberglass_reinforced_composite#read
19. Baştürk B. Effect of Fiber Orientation on the Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)/PVC Sandwich Composites. *Karaelmas Science and Engineering Journal*. 2023;13(1):52-61. <https://doi.org/10.7212/karaelmasfen.1177185> EDN: MUFFUP
20. Burton R.H., Folkes M.J. Fibre-Matrix Interactions in Reinforced Thermoplastics. *Mechanical Properties of Reinforced Thermoplastics*. Springer, Dordrecht. 1986. https://doi.org/10.1007/978-94-009-4193-9_9
21. Kathavate V.S., Amudha K., Adithya L., Pandurangan A., Ramesh N.R., Gopakumar K. Mechanical behavior of composite materials for marine applications – an experimental and computational approach. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2018;27.1-2:20180003. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2018-0003>
22. Композиционные материалы в строительстве: офиц. интернет-портал. URL: <https://ibooks.ru/bookshelf/391876/reading> (дата обращения: 29.08.2025)
23. Бирюков О.Р., Стройков В.А. Преимущества и недостатки применения полимерных композитных материалов в конструкциях военных автодорожных разборных мостов. *Вестник Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева*. 2018;1(13):65-69. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37189602_84447152.pdf EDN: UQUCRQ
24. Гиль А.И., Лазовский Е.Д. Экспериментальное исследование механических свойств стеклопластиковой арматуры. *Проблемы современного бетона и железобетона*. 2017;9:168-182. <https://belniis.by/collected-research-papers/archives/Volume9-2017/11-A.Hil-Ya.Lazowski/> EDN: XELHWU
25. Белова Н.А. Композитные материалы на основе углеродных волокон. *Молодой ученый*. 2015;24-1(104):5-7. <https://www.moluch.ru/archive/104/23577> EDN: VDFUKF
26. Кириллов А.А. Применение полимерных композитных материалов в капитальном строительстве. *Вестник молодого ученого УГНТУ*. 2023;2(22):205-211. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_54116276_80780465.pdf EDN: ZENVWC
27. Park S.J. Carbon Fibers. *Singapore: Springer Verlag*. 2019; 358. <https://i.twirpx.one/file/1588364/>
28. Сидорина А.И., Сафронов А.М. Исследование устойчивости углеродных волокон к окислению. *Труды ВИАМ*. 2022; 7(113):63-73. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-7-63-73> EDN: JUDFGU
29. Пискунов А.А., Луканкин С.А., Мазур Е.В., Петропавловских О.К., Ибрагимова А.А., Ньюхина Н.С., Рыбаков С.В. Применение полимерных композитных материалов в пролетных строениях автодорожных мостов. *Транспортные сооружения*. 2024;11:3. <https://doi.org/10.15862/09SATS324> EDN: FHRGTG
30. Ткачук А.И., Гребенева Т.А., Чурсова Л.В., Панина Н.Н. Термопластичные связующие. Настоящее и будущее. *Труды ВИАМ*. 2013;11:7. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21013196_16807076.pdf EDN: RRVQCL
31. Горбачева С.Н., Горбунова И.Ю., Кербер М.Л., Антонов С.В. Свойства композиционных полимерных материалов на основе эпоксидной смолы, модифицированных нитридом бора. *Успехи в химии и химической технологии*. 2017;31,11(192):35-36. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_30612528_51408517.pdf EDN: ZTXGBF

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пискунов Александр Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мосты и тоннели» Института пути, строительства и сооружений, Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация, a.piskunov52@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2606-9068>

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Луканкин Сергей Анатольевич – доктор физико-математических наук, главный специалист Научно-исследовательского центра «Тепло- и массообмен в строительстве» Института пути, строительства и сооружений, Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация, lukankin.sergej@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-1391-2987>

Петропавловских Ольга Константиновна – старший преподаватель кафедры «Автомобильные дороги, мосты и транспортные тоннели» Института транспортных сооружений, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Российская Федерация, olga_konst@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3022-8271>

Шарипов Артур Маратович – аспирант, ассистент кафедры «Мосты и тоннели» Института пути, строительства и сооружений, Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация, artur.sharipov.77@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-3827-1574>

Ибрагимова Ания Айратовна – аспирант, техник Научно-исследовательского центра «Тепло- и массообмен в строительстве» Института пути, строительства и сооружений, Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация, anyia13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1875-8771>

ВКЛАД АВТОРОВ

Пискунов А.А. – научное руководство, постановка задачи, выбор методов исследования, сбор информации, анализ и интерпретация результатов.

Луканкин С.А. – интерпретация результатов исследования, научное редактирование текста.

Петропавловских О.К. – редактирование текста статьи, корректировка структуры подачи материала.

Шарипов А.М. – сбор и обработка информации, составление выводов, теоретический анализ исследования.

Ибрагимова А.А. – сбор информации, анализ решаемой задачи, перевод, систематизация и изложение материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 22.10.2025; одобрена после рецензирования 05.02.2026; принята к публикации 11.02.2026.